

DE10144244

Publication Title:

Zoom-lens system esp. for micro-lithography illumination device e.g. for manufacture of semiconductor components, uses image plane as Fourier-transformed- plane to object plane

Abstract:

Abstract of DE10144244

A zoom-system has a number of lenses arranged along an optical axis (3) and defining an object plane (6), and an image plane (8) which is a Fourier-transformed plane to the object plane; at least one of the lenses is a movable lens (31,32). Between the object plane (6) and the image plane (8) lies a first intermediate image plane (25) conjugated to the image plane and a second intermediate image plane (27) Fourier- transformed to the image plane. At least one of the lenses (31,32) is arranged near to at least one of the intermediate image planes (25,27). . An Independent claim is given for (A) an illumination device and (B) for a method of manufacturing semiconductor components.

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

Courtesy of <http://v3.espacenet.com>

This Patent PDF Generated by Patent Fetcher(TM), a service of Stroke of Color, Inc.

Patent provided by Sughrue Mion, PLLC - <http://www.sughrue.com>

BEST AVAILABLE COPY



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 101 44 244 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
G 03 F 7/20
G 02 B 15/14

②① Aktenzeichen: 101 44 244.0
②② Anmeldetag: 5. 9. 2001
②③ Offenlegungstag: 20. 3. 2003

DE 101 44 244 A 1

⑦① Anmelder:
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

⑦④ Vertreter:
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster &
Partner, 70174 Stuttgart

⑦② Erfinder:
Köhler, Jess, Dr., 73447 Oberkochen, DE

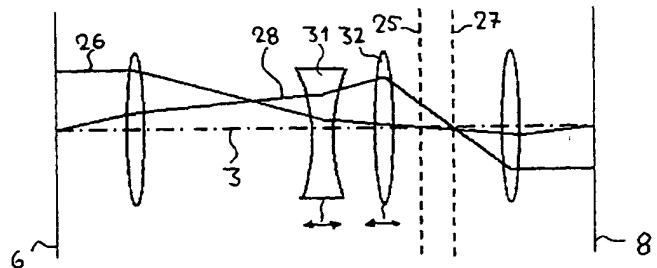
⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

DE	44 21 053 A1
US	59 55 243
US	52 45 384
US	52 37 367
EP	10 14 196 A2
EP	07 47 772 A1
WO	01 61 411 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Zoom-System, insbesondere für eine Beleuchtungseinrichtung

⑤⑦ Ein Zoom-System, welches besonders für eine Beleuchtungseinrichtung einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage geeignet ist, ist als Brennweiten-Zoom aufgebaut. Die Linsen des Zoom-Systems definieren eine Objekzebene (6) und eine Bildebene (8), welche eine Fourier-transformierte Ebene zur Objekzebene ist. Zwischen Objekzebene (6) und Bildebene (8) liegen eine zur Bildebene konjugierte Pupillenzwischenebene (25) und eine zur Bildebene Fourier-transformierte Feldzwischenbildebene (27). In der Nähe der Zwischenbildebenen (25, 27) ist mindestens eine verschiebbare Linse (31, 32) angeordnet. Das System zeichnet sich durch eine große Dehnung der in der Bildebene ausgeleuchteten Fläche bei kleinen Verschiebewegen und Eigengewichten der verschiebbaren Linsen (31, 32) aus.



DE 101 44 244 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein Zoom-System, insbesondere ein Zoom-System für eine Beleuchtungseinrichtung einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage.

- 5 [0002] Beleuchtungseinrichtungen in mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlagen haben die Aufgabe, ein Retikel, welches in der Objektebene eines nachfolgenden Projektionsobjektives angeordnet ist, gleichmäßig in einer genau an die optischen Eigenschaften des Projektionsobjektives angepassten Weise zu beleuchten. Die Beleuchtung soll te-
 10 lezentrisch sein, so dass die gerichteten Lichtschwerpunkte aller Punkte der Retikelebene möglichst exakt in der Eintrittspupille des Projektionsobjektives zentriert sind. Zudem ist es erwünscht, eine partiell kohärente Beleuchtung bereitzustellen, bei der der Füllgrad der Pupille variabel einstellbar ist. Für die Variation des Kohärenzgrades können Zoom-Sy-
 15 steme eingesetzt werden. Um bei der lithographischen Mikrostrukturierung eine weitgehende Annäherung an die Auflösungsgrenzen der optischen Projektion zu ermöglichen, wird vielfach auch die Beleuchtung entsprechend der Strukturen der einzelnen Vorlagen optimiert, indem diverse Beleuchtungsmodi, beispielsweise annulare Beleuchtung oder Quadru-
 pol-Beleuchtung erzeugt werden. Einrichtung hierfür, beispielsweise kegelförmige oder pyramidenförmige Axicons, können in Zoom-Systeme integriert sein. Schließlich besteht die Forderung nach einem hohen Wirkungsgrad, um die
 20 Lichtleistung der Lichtquellen mit geringstmöglichen Lichtverlusten für die Herstellung mikrostrukturierter Bauteile nutzen zu können.

- [0003] Beleuchtungseinrichtungen, welche diese Anforderung gut erfüllen, sind beispielsweise in der EP 0 747 772 oder der DE 44 21 053 bzw. EP 0 687 956 offenbart. Bei der Beleuchtungseinrichtung der EP 0 747 772 hat das Zoom-
 20 System eine Vielzahl von Linsen, die entlang einer optischen Achse angeordnet sind und eine Objektebene sowie eine Bildebene definieren, welche eine Fourier-transformierte Ebene zur Objektebene ist. Zwei Linsen sind verschiebbare Linsen, die bei der Einstellung von Zoomstellungen des Zoom-Systems zur Variation der Größe einer in der Bildebene ausgeleuchteten Fläche entlang der optischen Achse verschiebbar ist. In der Objektebene und in der Austrittspupille des Zoom-Objektivs sind jeweils diffraktive optische Rasterelemente mit zweidimensionaler Rasterstruktur angeordnet. Die
 25 Anordnung dient zur angepassten Erhöhung des Lichtleitwertes, wobei das in der Objektebene angeordnete Rasterelement zusammen mit dem Zoom-Objektiv einen kleineren Teil des Lichtleitwertes einfügt und das in der Bildebene angeordnete Rasterelement den Hauptanteil des Lichtleitwertes erzeugt und die Beleuchtung an die Feldgröße, beispielsweise die rechteckige Eintrittsfläche eines nachfolgenden, stabförmigen Lichtintegrators adaptiert. Das Zoomsystem hat einen dreifachen Dehnungsbereich, so dass partiell kohärente Beleuchtung mit Kohärenzgraden zwischen 0,3 und 0,9 einge-
 30 stellt werden können.

[0004] Aus der US 5,237,367 ist die Verwendung eines Zoom-Systems in der Beleuchtungseinrichtung eines Wafer-Steppers zur verlustfreien Einstellung des Kohärenzgrades bekannt.

[0005] Aus der US 5,245,384 ist ein afokales Zoom-System für die Beleuchtung bei Wafer-Steppern bekannt, mit dem ebenfalls der Kohärenzgrad verlustarm angepasst werden kann.

- 35 [0006] In der US 5,955,243 ist eine Beleuchtungseinrichtung mit einem afokalen optischem System beschrieben, welches als Strahlformer dient, um ein mit parallelen Lichtstrahlen einfallendes Lichtbündel in ein austretendes Lichtbündel größeren Querschnitts umwandelt, das ebenfalls parallele Lichtstrahlen aufweist. Das System hat eine eingangsseitige erste Linsengruppe mit negativer Brechkraft und eine darauf folgende zweite Linsengruppe mit stark positiver Brech-
 40 kraft, die gemeinsam den einkommenden Lichtstrahl in einer mit Abstand hinter der zweiten Linsengruppe liegenden Brennebene fokussieren. Mit größerem Abstand hinter der Brennebene ist eine dritte Linsengruppe mit positiver Brechkraft vorgesehen, die den vom Brennpunkt kommenden, divergenten Strahl parallelisiert. Bei dieser Anordnung soll die Energiedichte des Laserstrahls im Bereich der zweiten und dritten Linsengruppe, also beidseitig des Brennpunktes, kleiner sein als die Energiedichte des ankommenden Laserstrahls, wodurch strahlungsinduzierte Beschädigungen dieser Lin-
 45 sen vermieden werden sollen. Ein Mindestabstand dieser Linsen zur Brennebene darf dabei nicht unterschritten werden.

- [0007] Bei zahlreichen Anwendungsfällen, insbesondere im Bereich der mikrolithographischen Produktion von Halb-
 50 leiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen, ist es erwünscht, zwischen verschiedenen Beleuchtungssettings umschalten zu können, ohne dass Linsen große Wege verschoben werden müssen. Außerdem ist häufig eine große Dehnung, d. h. eine große Bildgrößenvariation erwünscht, um beispielsweise sehr unterschiedliche konventionelle Be-
 leuchtungssettings einstellen zu können. Eine besonders bei kurzen Lichtwellenlängen (beispielsweise 193 nm, 157 nm oder darunter) wichtiger werdende Randbedingung ist die Forderung, die Anzahl der optischen Flächen des Systems auf ein Minimum zu reduzieren, um Transmissionsverluste in Grenzen zu halten. Besonders bei Beleuchtungssystem, in den-
 55 nen hinter dem Zoom-System nur winkelerhaltende optische Elemente, z. B. stabförmige Lichtintegratoren, angeordnet sind, ist außerdem eine ausgangsseitige (bildseitige) Telezentrie des Zoom-Systems vorteilhaft, um eine Anpassung an die nachfolgenden optischen Systeme zu ermöglichen.

- [0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Zoom-System zu schaffen, welches bei geringen Verschiebewe-
 60 gen verschiebbarer Linsen eine große Bildgrößenvariation ermöglicht. Vorzugsweise soll sich das Zoom-System außerdem durch ausgangsseitige Telezentrie und hohe Transmission auszeichnen und für den Einsatz in einer Beleuchtungseinrichtung geeignet sein.

- [0009] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Zoom-System mit den Merkmalen von Anspruch 1. Vorteilhafte Weiter-
 60 bildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

- [0010] Bei einem erfindungsgemäßen Zoom-System sind dessen Linsen derart ausgebildet und angeordnet, dass zwi-
 65 schen der Objektebene und der Bildebene eine zur Bildebene konjugierte erste Zwischenbildebene (Pupillenzwischenbildebene) und eine zur Bildebene Fourier-transformierte zweite Zwischenbildebene (Feldzwischenbildebene) liegt und dass mindestens eine der Linsen des Zoom-Systems in der Nähe mindestens einer der Zwischenbildebenen angeordnet ist. Es wird also ein Brennweiten-Zoom vorgeschlagen, das eine Feldebene (Objektebene) in eine Pupillenebene (Bild-
 ebene) abbildet (Abbildung ins Unendliche) und das sowohl ein Zwischenbild der Feldebene, als auch ein Zwischenbild der Pupillenebene aufweist. Vorzugsweise ändert sich im Bereich des Zwischenbildes der Feldebene der Strahldurch-

messer stark, während sich im Bereich der Pupillenzwischenbildebene die Strahldivergenz stark ändert. Dies ist günstig, um eine gute Korrektionswirkung im Zwischenbildbereich zu bekommen. Wird nun im Bereich der starken Änderung von Strahldurchmesser und/oder Strahldivergenz eine Linse angeordnet, so kann bei relativ kleinen Relativverschiebungen zwischen dem Ort der Zwischenbildebene und der entsprechenden Linse eine große Dehnung des Bildfeldes erreicht werden. Da sich Linsen in Zwischenbildnähe außerdem in Bereichen kleiner Strahldurchmesser befinden, genügen optische Elemente mit kleinen Dimensionen. Daher können Linsen mit geringem Eigengewicht eingesetzt werden, die mit geringem Kraftaufwand beschleunigt und abgebremst werden können. Der Bereich der hier genannten Nähe zu einer Zwischenbildebene ist bevorzugt dadurch gekennzeichnet, dass in diesem optischen Nahbereich ein Verhältnis zwischen der lokalen Strahlhöhe und der maximalen Strahlhöhe innerhalb des Zoom-Systems kleiner oder gleich ca. 0,5 ist, insbesondere kleiner oder gleich 0,3.

[0011] Die erfindungsgemäße Konstruktion bringt auch Vorteile im Hinblick auf die Korrektion von Feld- und Winkelabhängigkeiten der Lichtverteilung in der Bildebene. Um eine annähernd homogene Leistungsdichtverteilung in der Bildebene des Systems zu erreichen, ist es günstig, ein Korrektionsmittel in einer zu dieser konjugierten Ebene zur Verfügung zu haben. Ebenso ist es von Vorteil, wenn in der Nähe einer zur Bildebene Fouriertransformierten Ebene ein optisches Korrektionsmittel vorhanden oder anbringbar ist, um die Bildwinkelverteilung einzustellen. Da die genannten Zwischenbildebenen solche Ebenen wirksamer Korrekturmöglichkeiten darstellen und dort bevorzugt Linsen, insbesondere verschiebbare Linsen, angeordnet sind, kann die Korrektion von Feld- und Winkelabhängigkeiten der Lichtverteilung in der Bildebene abhängig von der Zoomstellung erfolgen.

[0012] Grundsätzlich kann die optische Funktion einer einzelnen Linse auch durch eine Kombination mehrerer Linsen, d. h. eine Linsengruppe, oder durch eine zusätzliche asphärische Fläche erzielt werden. Der Begriff "Linse" umfasst in dieser Anmeldung daher allgemein auch eine "Linsengruppe".

[0013] Im bevorzugten Zoom-System befindet sich mindestens eine verschiebbare Linse im Bereich mindestens eines der Zwischenbilder, so dass die Bildgrößenvariation im wesentlichen durch eine Verschiebung dieser Linse erreicht werden kann. Es ist auch möglich, das System so auszulegen, dass sich die axiale Position von Zwischenbildern bei der Umschaltung zwischen Zoomstellungen deutlich ändert. In diesem Fall kann auch eine feststehende Linse in Zwischenbildnähe zu einer Veränderung der Bildgröße beitragen. Bei bevorzugten Ausführungsformen wird der wesentliche Beitrag zur Bildgrößenänderung über Bewegung mindestens einer zwischenbildnahen Linse erzeugt, wobei zusätzlich auch die Position von Zwischenbildebenen verlagert wird.

[0014] Einige Ausführungsformen zeichnen sich dadurch aus, dass mindestens eine der Linsen in einer ersten Zoomstellung bildseitig eines zugeordneten Zwischenbildes und in einer zweiten Zoomstellung objektseitig dieses Zwischenbildes angeordnet ist. Diese Zwischenbildebene ist bevorzugt eine Pupillenebene. Dabei bewegt sich diese Linse vorzugsweise durch den Bereich des Zwischenbildes, dessen Position sich relativ zur Verschiebung zur Linse nicht oder nur wenig ändert. Auch eine Bewegung ausschließlich des Zwischenbildes (bei feststehender Linse) oder einer Kombination beider Bewegungen ist möglich. Da die Änderungen von Strahldivergenz bzw. Strahldurchmesser im Bereich des Zwischenbildes maximal sind, sind bei diesen Ausführungsformen große Dehnungen mit einem Minimum an Verschiebungen möglich.

[0015] Besonders vorteilhaft ist es, wenn der maximale Verschiebeweg der verschiebbaren Linse nicht mehr als ca. 10% der Baulänge des Zoom-Systems beträgt, was besonders bei Anordnung verschiebbarer Linsen in Zwischenbildnähe möglich ist. Als Baulänge des Zoom-Systems wird hier der axiale Abstand zwischen der Objektebene und der Bildebene des Zoom-Systems bezeichnet. Diese Baulänge ist bei bevorzugten Ausführungsformen fest, was den Einbau derartiger Zoom-Systeme in räumlich definierte Einbauumgebungen beispielsweise einer Beleuchtungseinrichtung eines Wafer-Steppers erleichtert.

[0016] Bei bevorzugten Ausführungsformen kann eine Dehnung des Bildfeldes um einen Dehnungsfaktor von mehr als 4,0 erreicht werden, insbesondere von mehr als 5,0. Als Dehnung oder Dehnungsfaktor D wird hier das Verhältnis D eines maximalen Radius eines Beleuchtungsflekes in der Bildebene zum entsprechenden minimalen Radius des Beleuchtungsflekes in dieser Ebene bezeichnet. Ein Beispiel mit einem Dehnungsfaktor von 5,5 wird im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert.

[0017] Um eine optimale Dehnung bei gleichzeitig geringen individuellen Verschiebewegen einzelner Linsen zu fördern, ist gemäß einer Weiterbildung eine erste verschiebbare Linse und mindestens eine zweite verschiebbare Linse vorgesehen, die beim Wechsel zwischen verschiedenen Zoomstellungen auf unterschiedlichen Verschiebekurven verschiebbar sind. Dies kann z. B. durch unabhängige Antriebe oder durch eine geeignete nichtlineare Kopplung erreicht werden. Vorzugsweise ist dabei die Verschiebung der ersten verschiebbaren Linse und der zweiten verschiebbaren Linse derart gekoppelt oder koppelbar, dass ein Luftabstand zwischen den Linsen oder Linsengruppen im wesentlichen proportional zur Bildhöhe im Bereich einer der Linsen ist. Dies erleichtert u. a. die Steuerung der Verschiebemechanik.

[0018] Erfindungsgemäße Zoom-Systeme erlauben es, eine "entspannte" Optik mit minimalen Inzidenzwinkeln auf den einzelnen optischen Flächen und einer günstigen Brechkraftverteilung zu konstruieren, welche vorzugsweise etwa symmetrisch zur Mitte des Zoom-Systems ist. Günstig ist eine Brechkraftverteilung mit der Abfolge, positiv, negativ, positiv, positiv wobei bevorzugt die vordere und hintere positive Brechkraft durch axial feste Linsen und die negative sowie die darauf folgende positive Brechkraft durch verschiebbare Linsen bereitgestellt wird. Günstig ist, wenn die bildseitige positive Brechkraft größer, insbesondere mindestens dreimal so groß ist wie die objektseitige Brechkraft. Dadurch können im Bereich des Feldzwischenbildes kleine Strahlhöhen im Vergleich zur Objektgröße erzielt werden. Vorzugsweise ist die Brechkraft jeder verschiebbaren Linse bzw. Linsengruppe größer als diejenige der feststehenden Linsengruppen, insbesondere mehr als doppelt so groß. Dadurch ist große optische Wirkung im Bereich verschiebbarer Linsen konzentriert, was die große Dehnung bei geringer Linsenverschiebung fördert. Insbesondere kann die Brechkraft jeder der verschiebbaren Linsen größer als die maximale Brechkraft des Gesamtsystems sein, vorzugsweise mindestens fünf bis zehnmal so groß.

[0019] Die günstige Strahlführung bevorzugter Ausführungsformen ist auch anhand der Brennweite des Gesamtsystems charakterisierbar, die abhängig vom Bilddurchmesser bzw. vom Durchmesser der beleuchteten Fläche zwischen

einem Minimalwert f_1 und einem Maximalwert f_2 variiert. Der Minimalwert ist vorzugsweise kleiner als die Baulänge, er kann weniger als ein Drittel der Baulänge betragen. Der Maximalwert dagegen ist vorzugsweise größer als die Baulänge und kann insbesondere mehr als das Doppelte der Baulänge betragen. Das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Brennweite entspricht dem Dehnungsfaktor D.

[0020] Bei bevorzugten Weiterbildungen kann die Anzahl der optischen Elemente im Vergleich zu bisherigen Zoom-Systemen trotz der zusätzlichen vollen Abbildung in erfindungsgemäßen Zoom-Systemen reduziert werden. Hierzu kann vorgesehen sein, dass zwischen der Objektebene und der Bildebene mindestens eine optische Komponente mit mindestens einer asphärischen Fläche angeordnet ist. Besonders vorteilhaft ist, wenn mindestens eine solche asphärische Komponente vorgesehen ist, deren asphärischen Fläche in der Nähe mindestens eines Zwischenbildes angeordnet ist. Diese asphärische Fläche ist vorzugsweise an einem verschiebbaren Element angeordnet, wodurch die Korrektionswirkung der Asphäre gegebenenfalls stark variiert werden kann. Bei einem bevorzugten System gibt es sowohl auf mindestens einer feststehenden Linse, als auch auf mindestens einer beweglichen Linse mindestens eine Asphäre. Insbesondere kann mehr als ein Drittel der Linsen Asphären aufweisen. Dies fördert eine Einsparung von Linsen bzw. Linsenmaterial. Zoomsysteme mit weniger als 20 oder 15 optisch wirksamen Flächen sind möglich. Bevorzugt sind weniger, beispielsweise 12 oder nur 10 optische Flächen, wie bei dem anhand der Zeichnungen beschriebenen Fünf-Linsen-Zoom.

[0021] Um eine Schädigung von Linsen aufgrund hoher Lichtenergiedichten zu vermeiden, kann das System so aufgebaut werden, dass in unmittelbarer Nähe eines Einschnürungspunktes, also in einem energetischen Nahbereich um das Feldzwischenbild (zweite Zwischenbildebene) kein optisches Material angeordnet ist. Der "energetische Nahbereich" ist so dimensioniert, dass außerhalb des Nahbereiches die an den Linsen auftretenden Lichtfleckdurchmesser deutlich größer sind als der minimale Lichtfleckdurchmesser in der Zwischenfeldebene. Wird z. B. ein solches Zoom-System in eine Beleuchtungseinrichtung eingebaut, bei der in der Objektebene des Zoom-Systems ein optisches Rasterelement mit zweidimensionaler Rasterstruktur angeordnet ist, welches hinter sich ein Fokusgitter erzeugt, so kann dadurch erreicht werden, dass das Bild des Fokusgitters innerhalb des Zoom-Objektives liegt und im Bereich des Bildes des Fokusgitters kein optisches Material angeordnet ist. Es kann erreicht werden, dass die maximale Energiedichte des Lichtes, welches auf eine optische Fläche des Zoom-Systems trifft, stets kleiner ist als das 1,5-fache der Energiedichte des Lichts in der Objektebene. So werden Spitzen der Lichtenergiedichte, die zu einer lichtunterstützten Ansammlung von Verunreinigungen auf den optischen Flächen und/oder zu Beschädigungen von Linsen bzw. zur Verringerung von deren Lebensdauer führen können, zuverlässig vermieden.

[0022] Die vorstehenden und weiteren Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können. Es zeigen:

[0023] Fig. 1 eine schematische Übersicht einer Ausführungsform einer Beleuchtungseinrichtung für ein Projektions-Mikrolithographiegerät mit einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Zoom-Systems;

[0024] Fig. 2 eine schematische Darstellung von Strahlverläufen des Randstrahls zur Feldmitte und des Hauptstrahls zum Feldrand bei einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Zoom-Systems;

[0025] Fig. 3 einen Linsenschnitt durch eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Zoom-Systems in sechs Zoomstellungen und

[0026] Fig. 4 ein Diagramm, welches die auf die Energiedichte des Lasers normierte maximale Energiedichte des auf eine Fläche auffallenden Laserlichts als Funktion der optischen Flächen des Zoom-Systems zeigt.

[0027] In Fig. 1 ist ein Beispiel einer Beleuchtungseinrichtung 1 einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage gezeigt, die bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen einsetzbar ist und zur Erzielungen von Auflösungen bis zu Bruchteilen von Mikrometern mit Licht aus dem tiefen Ultraviolettbereich arbeitet. Als Lichtquelle 2 dient ein F_2 -Excimer-Laser mit einer Arbeitswellenlänge von ca. 157 nm, dessen Lichtstrahl coaxial zur optischen Achse 3 des Beleuchtungssystems ausgerichtet ist. Andere UV-Lichtquellen, beispielsweise ArF-Excimer-Laser mit 193 nm Arbeitswellenlänge, KrF-Excimer-Laser mit 248 nm Arbeitswellenlänge oder Quecksilberdampf lampen mit 368 nm bzw. 436 nm Arbeitswellenlänge oder Lichtquellen mit Wellenlängen unterhalb 157 nm sind ebenfalls möglich. Das Licht der Lichtquelle 2 tritt zunächst in einem Strahlaufweiter 4 ein, der beispielsweise als Spiegelanordnung gemäß der DE 41 24 311 ausgebildet sein kann und zur Kohärenzreduktion und Vergrößerung des Strahlquerschnitts auf z. B. $y = 35 \pm 10$ mm und $x = 10 \pm 5$ mm dient. Ein optional vorgesehener Verschluss ist bei der gezeigten Ausführungsform durch eine entsprechende Pulssteuerung des Lasers 2 ersetzt.

[0028] Ein erstes diffraktives, optisches Rasterelement 5 ist in der Objektebene 6 eines im Strahlengang dahin angeordneten Zoom-Objektivs 7 angeordnet, in dessen Bildebene 8 bzw. Austrittspupille ein zweites diffraktives optisches Rasterelement 9 angeordnet ist.

[0029] Eine dahinter angeordnete Einkoppeloptik 10 überträgt das Licht auf die Eintrittsfläche 11 eines aus Kalziumfluorid gefertigten, stabförmigen Lichtintegrators 12, der das durchtretende Licht durch mehrfache innere Reflexion mischt und homogenisiert. Unmittelbar an der Austrittsfläche 13 des Stabes 12 liegt eine Zwischenfeldebene, in der ein Reticle/Masking-System (REMA) 14 angeordnet ist, welches als verstellbare Feldblende dient. Das nachfolgende Objektiv 15 bildet die Zwischenfeldebene mit dem Maskierungssystem 14 auf Retikel 16 (Maske, Lithographievorlage) ab und enthält eine erste Linsengruppe 17, eine Pupillenzwischenebene 18, in die Filter oder Blenden eingebracht werden können, eine zweite und eine dritte Linsengruppe 19 bzw. 20 und dazwischen einen Umlenkspiegel 21, der es ermöglicht, die große Beleuchtungseinrichtung (ca. 3 m Länge) horizontal einzubauen und das Retikel 16 waagrecht zu lagern.

[0030] Dieses Beleuchtungssystem bildet zusammen mit einem (nicht gezeigten) Projektionsobjektiv und einem verstellbaren Wafer-Halter, der das Retikel 16 in der Objektebene des Projektionsobjektivs hält, eine Projektionsbelichtungsanlage für die mikrolithographische Herstellung von elektronischen Bauteilen, aber auch von optisch diffraktiven Elementen und anderen mikrostrukturierten Teilen.

[0031] Bei einem Wafer-Stepper wird auf dem Retikel 16 die gesamte, einem Chip entsprechende strukturierte Fläche, im allgemeinen ein Rechteck mit einem beliebigen Aspektverhältnis von beispielsweise 1 : 1 bis 1 : 2, insbesondere

1 : 1,3, so gleichmäßig und randscharf wie möglich beleuchtet.

[0032] Bei einem Wafer-Scanner wird auf dem Retikel ein schmaler Streifen, typischerweise ein Rechteck mit einem Aspektverhältnis von 1 : 2 bis 1 : 8 beleuchtet, und durch Scannen das gesamte strukturierte Feld eines Chips seriell beleuchtet. Auch hier ist die Beleuchtung extrem gleichmäßig und, in Richtung senkrecht zur Scanrichtung, randscharf zu gestalten.

[0033] In manchen Fällen sind auch andere Formen der beleuchteten Fläche auf dem Retikel 16 möglich. Die Öffnung des Reticle-Masking-Systems 14 und der Querschnitt des Stabes 12 sind zweckmäßig der benötigten Form genau angepasst.

[0034] Die Ausführung der dem stabförmigen Lichtintegrator 12 vorgelagerten Teile, insbesondere der optischen Rasterelemente 5 und 9, ist so gewählt, dass die Stabeintrittsfläche 11 weitgehend homogen und mit höchstmöglichem Wirkungsgrad, das heißt ohne wesentliche Lichtverluste neben der Eintrittsfläche, ausgeleuchtet wird. Hierzu wird der vom Strahlaufweiter 4 kommende, parallele Lichtstrahl mit rechteckigem Querschnitt und einer nicht rotationssymmetrischen Divergenz zunächst durch das erste diffraktive Rasterelement 5 unter Einführung von Lichtleitwert bezüglich Divergenz und Form verändert. Insbesondere hat das erste Rasterelement 5 eine Vielzahl sechseckiger Zellen, die eine Winkelverteilung dieser Form erzeugen. Die numerische Apertur des ersten diffraktiven Rasterelements beträgt beispielsweise NA = 0,025, wodurch etwa 10% des gesamten einzuführenden Lichtleitwertes eingeführt werden. Das in der vorderen Brennebene der Zoomoptik 7 angeordnete erste optische Rasterelement 5 präpariert zusammen mit der Zoomoptik 7 einen Beleuchtungsfleck variabler Größe in der hinteren Brennebene bzw. Bildebene 8 des Zoom-Systems. Hier ist das zweite optische Rasterelement 9 angeordnet, das als refraktives optisches Element mit rechteckiger Abstrahlcharakteristik ausgebildet ist. Dieses Element erzeugt den Hauptanteil des Lichtleitwertes und adaptiert den Lichtleitwert über die Einkoppel-Optik 10 an die Feldgröße, das heißt an die Form der rechteckigen Eintrittsfläche 11 des Stabintegrators 12.

[0035] Der Aufbau des Beleuchtungssystems mit Ausnahme des Zoom-Objektivs 7 kann beispielsweise dem in der EP 0 747 772 beschriebenen Aufbau entsprechen, deren Offenbarungsgehalt insoweit durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird. Auch andere Konstruktionen sind möglich. Beispielsweise kann anstelle des Moduls mit Einkoppelgruppe 10 und Stabintegrator 12 ein Modul mit einem Wabenkondensator und einer Feldlinse vorgesehen sein.

[0036] Im folgenden werden Aufbau und Wirkungsweise sowie Besonderheiten des Zoom-Systems 7 näher erläutert. In Fig. 2 sind zur Erläuterung der Abbildungseigenschaften des Zoom-Systems 7 die Verläufe von ausgezeichneten Strahlen innerhalb des Systems schematisch dargestellt. Das Zoom-System 7 ist ein Brennweiten-Zoom, bei dem die Objektelebene 6 und die Bildebene 8 Fourier-transformierte Ebenen sind. Zwischen der Objektelebene 6 und der Bildebene 8 befindet sich in einer zur Bildebene 8 konjugierten Ebene 25 (erste Zwischenbildebene) ein Pupillenzwischenbild. Dessen axiale Lage ist dadurch bestimmt, dass hier ein Hauptstrahl 26 eines am Rand des Eintrittsfeldes liegenden Feldrandpunktes die optische Achse 3 schneidet. Der Hauptstrahl wird hier auch als Feldrand-Aperturmitten-Strahl bezeichnet und verläuft in der Objektelebene 6 im wesentlichen parallel zur optischen Achse 3. Der zweite Schnittpunkt des Hauptstrahls 26 mit der optischen Achse befindet sich in der Bildebene 8. Weiterhin liegt zwischen der Objektelebene und der Bildebene eine zur Bildebene 8 Fourier-transformierte zweite Zwischenbildebene 27, in der ein Feldzwischenbild angeordnet ist. Die axiale Lage der Feldzwischenbildebene, welche zur Feldebene 6 konjugiert ist, ergibt sich daraus, dass hier die Aperturrandstrahlen 28 eines auf der optischen Achse 3 liegenden Mittensbüschels die optische Achse 3 wieder schneiden. Der Feldmitte-Aperturrand-Strahl 28 verläuft in der Bildebene im wesentlichen parallel zur optischen Achse 3. Das System ist vorzugsweise so ausgelegt, dass die minimale Strahlhöhe im Feldzwischenbild 27 weniger als 50%, insbesondere weniger als 20% der Strahlhöhe in der Objektelebene 6 beträgt. Die hier an Hand einer Schemazeichnung erläuterte Abfolge von Zwischenbildern zwischen der Objektelebene 6, welche eine Feldebene ist, und der Bildebene 8, welche eine Pupillenebene ist, ist bei allen Zoomstellungen des Zoom-Objektivs 7 gegeben, wobei jedoch die axialen Positionen von Pupillenzwischenbild 25 und Feldzwischenbild 27 variieren können.

[0037] An Hand von Fig. 3 sowie der Tabellen 1 bis 3 wird nun der optische Aufbau einer bevorzugten Ausführungsform eines Zoom-Systems 7 mit fünf Linsen näher erläutert. Das Zoom-System 7 hat eine feste Baulänge (Abstand Objektelebene – Bildebene) von ca. 1220 mm. In einem Arbeitsabstand von 144 mm von der Feldebene 6 ist eine bikonvexe erste Linse 30 mit Eintrittsfläche F2 und Austrittsfläche F3 angeordnet. Dieser folgt mit variablem Luftabstand eine bikonkave zweite Linse 31, die bezüglich Linsendurchmesser und Gewicht die kleinste Linse des Zoom-Systems ist und eine Eintrittsfläche F4 und eine Austrittsfläche F5 aufweist. Mit variablem Luftabstand folgt eine bikonvexe dritte Linse 32 mit asphärischer Eintrittsfläche F6 und sphärischer Austrittsfläche F7. Die zweite Linse 31 und die dritte Linse 32 sind axial beweglich geführt und bilden die einzigen verschiebbaren Linsen des Zoom-Systems. Mit großem Abstand hinter der dritten Linse 32 folgt eine vierte Linse 33 mit positiver Brechkraft, einer nahezu ebenen Eintrittsfläche F8 und einer asphärischen Austrittsfläche F9. Dieser folgt mit festem Abstand eine ortsfest montierte fünfte Linse 34 mit konvexer Eintrittsfläche F10 und ebener Austrittsfläche F11, der mit einem Abstand von 110 mm die Bildebene 8 folgt. Die letzte Linse 34 kann alternativ durch ein Axicon-Paar mit einander zugewandten, kegel- oder pyramidenförmigen Flächen ersetzt sein, die bevorzugt bis zum flächigen Berührungskontakt aneinander geschoben werden können, um wahlweise konventionelle oder Ring- bzw. Quadrupolbeleuchtung einzustellen. Zwischen den Linsen 33 und 34 ist ausreichend Bauraum vorhanden, um einen optional vorgesehenen Umlenkspiegel anzuordnen. Die Winkel der Lichtstrahlen in diesem Bereich liegen innerhalb einer Winkelbandbreite von nur ca. 6°, was eine einfache und dennoch wirksame Spiegelbeschichtung ermöglicht.

[0038] Die Krümmungsradien r [mm] der Linsenflächen, die entsprechenden Dicken d [mm] sowie die halben maximalen Strahldurchmesser h_{\max} [mm], welche an den Flächen F der Linsen auftreten, sind in Tabelle 1 gezeigt. Tabelle 2 zeigt die asphärischen Konstanten der nicht sphärischen Flächen $F6$ und $F9$ des Zoom-Systems in der üblichen Notation. In Tabelle 3 sind für sechs verschiedene Zoomstellungen (Zoomstellung 1 bis Zoomstellung 6, in Fig. 3 von oben nach unten) die axialen Dimensionen der variablen Lufträume hinter den Linsenflächen $F3$, $F5$ und $F7$ [in mm] gezeigt. Sämtliche Linsen sind aus CaF_2 gefertigt, das bei der Betriebswellenlänge von 157,63 nm einen nominalen Brechungsindex $n = 1,558$ hat. Die axialen Positionen von Pupillenzwischenebene 25 und Feldzwischenenebene 27 ist jeweils eingezeichnet.

[0039] Im folgenden werden die Funktionen und weitere Besonderheiten des Zoom-Systems erläutert. Die Objektebene (Feldebene 6) wird durch eine Lichtverteilung mit rechteckigem Profil von ca. 20 mm × 15 mm beleuchtet. Durch das in der Objektebene angeordnete erste diffraktive Rasterelement 5 wird in der Objektebene eine Winkelverteilung erzeugt, die im Winkelraum eine sechseckige Form hat. Die mittlere numerische Apertur beträgt hier 27 mrad. Dieses Licht durchstrahlt die Linsen des Zoom-Systems und erzeugt vignettierungsfrei in der Bildebene 8 eine beleuchtete Fläche mit sechseckiger Form, wobei die Größe der beleuchteten Fläche durch Verschiebung der verschiebbaren Linsen 31, 32 stufenlos einstellbar ist. Der Radius der zu dieser sechseckigen Form konstruierbaren Kreisfläche ist bei dieser Ausführungsform zwischen einem Minimalradius von ca. 10 mm (Zoomstellung 1, in Fig. 3 oben) und ein Maximalradius von ca. 55 mm (Zoomstellung 6, in Fig. 3 unten) veränderbar, was einem Dehnungsfaktor bzw. einer Dehnung von 5,5 entspricht. Der maximale Bilddurchmesser ist damit kleiner als ca. 10% der Baulänge, es handelt sich also um ein "langes Zoom". In jeder Zoomstellung variiert die Energiedichte in der Bildebene 8 (abgesehen vom Kantenbereich der Lichtverteilung) um maximal ca. 5%. Die Schwerstrahlrichtungen weichen für alle Zoomstellungen um höchstens 1 mrad von der Richtung der optischen Achse 3 ab. Die Lichtbündel in der Bildebene haben in jeder Zoomstellung eine Apertur von weniger als ca. 0,055. Dadurch hat die genaue Lage der Bildebene, welche je nach Zoom-Stellung variieren kann, wenig Einfluß auf die Lichtverteilung in der realen festen Bildebene. Außerdem hat die jeweilige Winkelverteilung in einem derart niedrig-aperturigen Bündel nur einen sehr geringen Einfluß auf die Performance des Bildes. Die minimal beleuchtete Fläche in der Bildebene ist kleiner als der Lichtfleck in der Objektebene und die maximal beleuchtete Bildfläche ist größer als die Objektfeldgröße.

[0040] Die in Fig. 4 dargestellte maximale Energiedichte, welche an den einzelnen Systemflächen auftritt, ist bei keiner der optischen Flächen F2 bis F11 größer als das 1,5-fache der Energiedichte des Laserlichtes in der Objektebene 6. Dadurch ist keine der Linsen des Zoom-Systems besonderen energetischen Belastungen ausgesetzt. Hierzu trägt vor allem auch bei, dass im energetischen Nahbereich der Feldzwischenbildebene 27 bei keiner der Zoomstellungen optisches Material angeordnet ist. Dies ist unter anderem daran zu erkennen, dass dieser energetische Einschnürpunkt bei allen Zoomstellungen im mittleren Drittel des Luftabstandes zwischen der verschiebbaren dritten Linse 32 und der ortsfesten vierten Linse 33 liegt, bzw. dass die Lichtfleckdurchmesser an den Orten der Linsen 32 und 33 deutlich größer sind als der minimale Lichtfleckdurchmesser in der Zwischenbildebene. Wenn im Bereich der Objektebene ein Fokusgitter liegt, welches z. B. durch ein optisches Rasterelement erzeugt werden kann, so liegt das Bild des Fokusgitters ebenfalls aus energetischer Sicht weit entfernt von optischem Material, da das Bild des Fokusgitters im Bereich der Zwischenfeld-ebene 27 liegen wird.

[0041] Die günstige Energieverteilung drückt sich auch dadurch aus, dass es mindestens eine Linse gibt, deren beleuchtete Fläche einen Durchmesser hat, der in jeder Zoom-Stellung wenigstens 90% des Linsendurchmessers beträgt. Diese Bedingung ist im Beispielsystem für die erste feststehende Linse 30 und die erste verschiebbare Linse 31 erfüllt. Bei Linsen, die diese Bedingung erfüllen, ist die energetische Belastung für alle Zoom-Stellungen ähnlich. Dies ist bei der Ausführungsform besonders nützlich, da es sich hier um Linsen mit relativ kleinem Durchmesser handelt. Es gibt auch eine verschiebbare Linse (Linse 32) und feststehende Linsen (Linsen 33 und 34), deren beleuchtete Fläche relativ stark variiert und einen Durchmesser hat, der zwischen ca. 60% und ca. 100% des Linsendurchmessers liegt. Hier ist die energetische Belastung für verschiedenen Zoom-Stellungen zwar unterschiedlich. Dies wirkt sich aber in der Praxis bei dem Ausführungsbeispiel nichtnegativ aus, da die Linsendurchmesser an sich schon groß sind. Ein Vorteil der relativ starken Variation des Lichtfleckdurchmessers liegt darin, dass die Randbereiche der Linsen für die Zoom-Stellungen mit großen Bilddurchmessern genutzt werden können, während der achsnahe Teil der Linsenflächen für die Korrektur der Zoom-Stellungen mit kleinem Bild verwendet werden können.

[0042] Die große Dehnung D wird bei erfindungsgemäßen Zoom-Systemen mit relativ kleinen Axialverschiebungen von beweglichen Linsen erreicht, die zudem noch kleine Durchmesser bzw. kleine Eigengewichte haben können, da sie im Bereich von mindestens einem Zwischenbild 25, 27 des Systems angeordnet sind. Beide verschiebbaren Linsen 31, 32 sind Einzellinsen, so dass nur wenig Linsenmaterial verschoben werden muß und die Verschiebemechanik konstruktiv einfach ausgelegt werden kann. Insbesondere ist die Linse 31 mit dem geringsten Eigengewicht eine verschiebbare Linse. Es kann vorgesehen sein, dass der Linsendurchmesser von mindestens einer der beweglichen Linsen weniger als 40%, insbesondere weniger als 25% des maximalen Bildfelddurchmessers beträgt. An Hand von Fig. 3 ist zu erkennen, dass die zweite Linse 31 zwischen ihrer objektnächsten Stellung 35 (Zoomstellung 1) und der bildnächsten Stellung 36 (Zoomstellung 3) nur um maximal ca. 55 mm axial bewegt werden muss, was weniger als 5% der Gesamtbaulänge des Zoom-Systems entspricht. Die dritte Linse 32 wird zwischen ihrer objektnächsten Stellung 37 (bei Zoomstellung 1) und der bildnächsten Stellung 38 (Zoomstellung 6) um weniger als 120 mm bewegt, was weniger als 10% der Baulänge entspricht. In Verbindung mit den geringen Massen der verschiebbaren Einzellinsen ist dadurch für die Linsenverschiebung nur wenig Energie aufzuwenden.

[0043] An Hand von Fig. 3 ist auch leicht zu erkennen, dass zwischen den Verschiebungskurven der verschiebbaren Linsen 31, 32 kein einfacher, linearer Zusammenhang existiert. Vielmehr wird die größere Linse 32 beim Wechsel zwischen Zoomstellung 1 (kleinster Beleuchtungsdurchmesser) nach Zoomstellung 6 (größter Beleuchtungsdurchmesser) kontinuierlich weiter zur Bildebene verschoben, während die kleinere, zweite Linse 31 beim Wechsel von Zoomstellung 1 nach Zoomstellung 2 zum Bild geschoben, beim Wechsel von Zoomstellung 2 nach Zoomstellung 3 fast unverändert gelassen und danach in Richtung Objektebene 6 verschoben wird. Dies kann durch gesonderte Antriebe für die verschiebbaren Linsen 31, 32 oder durch eine nichtlineare mechanische Kopplung der Linsen erreicht werden. Es ist erkennbar, dass der Luftraum zwischen den beiden bewegten Linsen 31, 32 der Bildhöhe in diesem Bereich etwa proportional ist. Dies erleichtert die Verschiebungssteuerung.

[0044] Weiterhin ist zu erkennen, dass der axiale Abstand zwischen einer verschiebbaren Linse und einer festen Linse stets größer ist als der doppelte Wert des maximalen Verschiebeweges. Dadurch bleibt viel Bauraum für die Antriebsmechanik der verschiebbaren Linsen. Die verschiebbaren Linsen 31, 32 befinden sich im mittleren Drittel des Zoom-Systems 7. Dadurch ist genügend Platz für die Führungsschienen gegeben, entlang denen die beweglichen Elemente verfahren werden können. Axial außerhalb des Führungsschienenbereiches bleibt genügend Platz für eine optional vorgese-

hene Wechseleinrichtung für das Rasterelement 5 und/oder für einen gegebenenfalls im Zoom-System vorhandenen Umlenkspiegel, der beispielsweise zwischen den festen Linsen 33 und 34 angeordnet sein kann. Zwischen den verschiebbaren Linsen befindet sich keine feste Linse. Dadurch werden Einschränkungen der Verfahrwege für diese Linsen vermieden. Die erste verschiebbare Linse 31 kann sich in einer Zoom-Stellung an einem Ort befinden, an dem in einer anderen Zoom-Stellung die zweite verschiebbare Linse 32 angeordnet war. Dabei ermöglicht es das Design, dass zwischen den verschiebbaren Linsen immer ein minimaler Abstand verbleibt, welcher im Beispiel mindestens 25% des minimalen Bilddurchmessers beträgt. Die verschiebbaren Linsen haben also immer einen Mindestabstand, so dass Kollisionen durch "Überschwinger", die bei großen Beschleunigungen theoretisch auftreten können, ausgeschlossen sind. Dies erhöht die Funktionssicherheit des Zoom-Systems.

[0045] Weiterhin ist zu erkennen, dass die größere der verschiebbaren Linsen beim Wechsel zwischen Zoomstellungen den Bereich des Pupillenzwischenbildes 25 durchtritt. Dieses liegt beim Zoomstellung 1 bildseitig der dritten Linse 32, bei Zoomstellung 2 innerhalb der dritten Linse 32 und bei den übrigen Zoomstellungen auf der Objektseite der Linse 32. Da die Eintrittsfläche F6 der dritten Linsen 32 eine asphärische Fläche ist, die durch den Bereich des Pupillenzwischenbildes wandert, ist ein besonders starker Einfluss dieser Asphäre auf die mit dem Zoom-System erzielte Abbildung möglich. Dadurch kann die Korrektur von Feld- und Winkelabhängigkeiten der Lichtverteilung in der Bildebene 8 abhängig von der Zoomstellung erfolgen.

[0046] Die Besonderheiten erfindungsgemäßer Zoom-Systeme sind auch an der Brechkraftverteilung des Zoom-Systems erkennbar. Einer axialen feststehenden Linse oder Linsengruppe mit positiver Brechkraft folgt eine axial verschiebbare Linse oder Linsengruppe mit negativer Brechkraft. Dieser folgt eine axial verschiebbare Linse oder Linsengruppe mit positiver Brechkraft und eine axial feststehende Linse oder Linsengruppe mit positiver Brechkraft. Die Brechkraft der zweiten feststehenden Linsengruppe ist dabei vorzugsweise größer als diejenige der ersten feststehenden Linsengruppe, vorzugsweise mindestens dreimal so groß wie deren Brechkraft. Diese Brechkraftverteilung drückt sich in der schon erwähnten sehr kleinen Strahlhöhe am Ort des Feldzwischenbildes 27 im Vergleich zur Objektgröße aus. Auffällig ist auch, dass die Brechkraft jeder der verschiebbaren Linsen 31, 32 größer ist als die der feststehenden Linsen bzw. Linsengruppen, insbesondere mehr als doppelt so groß. Dadurch ist eine große optische Wirkung im Bereich der verschiebbaren Linsen konzentriert. Dies fördert eine große Änderung der Bildgröße bei geringer Linsenverschiebung. Die Brechkraft jeder der verschiebbaren Linsen 31, 32 ist größer als die maximale Brechkraft des Gesamtsystems, sie kann insbesondere zehnfach so groß oder größer sein. Auch dies drückt die günstige Konzentration der optischen Wirkung im Bereich der verschiebbaren Linsen bei geringen Verschiebewegen aus.

[0047] Die Brechkraftverteilung ist qualitativ etwa symmetrisch zur axialen Mitte des Zoomsystems. Dadurch wird eine relativ "entspannte" Strahlführung innerhalb der Optik möglich. Dies ist u. a. daraus ersichtlich, dass der maximale Inzidenzwinkel i der auf eine optische Fläche des Zoom-Systems auftreffenden Strahlung bei keiner Zoom-Stellung größer als ca. 44° ist ($\sinus\ i < 0,69$). Als Inzidenzwinkel wird hier der Winkel zwischen der Einstrahlrichtung eines Lichtstrahles und der Flächennormalen einer optischen Fläche am Auftreffpunkt bezeichnet. Diese niedrigen Inzidenzwinkel sind günstig für die Vermeidung von Bildfehlern und ermöglichen es vor allem, die optischen Flächen der Linsen mit geeigneten Antireflexbeschichtungen wirksam zu entspiegeln, wodurch die Transmission des Gesamtsystems erhöht und die Erzeugung von Falschlicht vermieden werden kann.

[0048] Die relativ "entspannte" Optik ist auch an den Brennweiten des Systems erkennbar. Bei der gezeigten Ausführungsform ist die Brennweite des Zoom-Systems in der Stellung mit dem minimalen Bilddurchmesser (Zoom-Stellung 1) $f_1 = 368$ mm, in der Stellung mit dem maximalen Durchmesser (Zoom-Stellung 6) beträgt sie $f_2 = 2031$ mm. Dies erfüllt eine als besonders vorteilhaft erkannte Brennweitenbedingung, welche die Brennweite f_1 bei minimalem Bilddurchmesser, die Brennweite f_2 bei maximalem Bilddurchmesser und die Baulänge (BL) des Systems verknüpft. Danach ist es besonders vorteilhaft, wenn die Baulänge größer als f_1 ist, insbesondere mindestens dreimal so groß wie f_1 und/oder wenn die Baulänge kleiner als f_2 ist, insbesondere wenn sie weniger als die Hälfte von f_2 beträgt.

[0049] Die erste Linse 30 ist so gelagert, dass sie senkrecht zur optischen Achse 3 zweidimensional verschiebbar ist. Das Design des Zoom-Systems ist so ausgelegt, dass eine Dezentrierung der ersten Linse von der optischen Achse weg in erster Näherung ausschließlich auf den Versatz des Bildfeldes wirkt. Typische Dezentrierungen können im Bereich von Bruchteilen von Millimetern liegen. Diese Dezentrierung kann dazu verwendet werden, die Versetzung des Bildfeldes, welche beispielsweise durch Toleranzen der optischen Elemente und ihrer Halterungen auftritt, zu verkleinern oder vollständig zu kompensieren. Die erste Linse 30 hat außerdem einen nur geringen Abstand zur Objektebene 6, der weniger als 15% der Zoom-Baulänge beträgt. Dies ist vorteilhaft für eine gasunterstützte Reinigung des Zwischenraumes zwischen dem Rasterelement 5 und dem Zoom-System 7 und erleichtert zudem die Korrektur insbesondere der sphärischen Aberration, wodurch geringe Kantenbreiten der Energieverteilung in der Bildebene gefördert werden. Das Zoom-System kann an die objektseitige Lichtverteilung, z. B. die Feldgröße, die Feldform, die Apertur und die Hauptstrahlrichtungen angepasst werden. Insbesondere ändert es nichts am Zoom-Prinzip, wenn anstelle der telezentrischen eine homozentrische Lichtverteilung in der Objektebene vorliegt.

[0050] Die Erfindung umfasst auch ein Verfahren, die Lichtverteilung in der Bildebene 8 zu beeinflussen, und zwar ohne Veränderung der Position der Linsen des Zoom-Systems. Es wurde herausgefunden, dass eine Kippung und/oder Dezentrierung der eingangsseitigen Lichtverteilung des Lasers dazu genutzt werden kann, um (unabhängig von der Zoom-Stellung) einen konstanten Bildversatz und einen konstanten Winkelkipp der Lichtverteilung in der Bildebene des Zoom-Systems einzustellen. Als Kippung wird hier eine Winkelverstellung der Laserstrahlrichtung relativ zur optischen Achse des Beleuchtungssystems bezeichnet. Eine Dezentrierung der eingangsseitigen Lichtverteilung bedeutet eine Verschiebung dieser Lichtverteilung senkrecht zur optischen Achse.

[0051] Durch Manipulation bzw. Einstellung der Konvergenz/Divergenz der in die Beleuchtungseinrichtung eintretenden Laserstrahlung kann alternativ oder zusätzlich die axiale Position (z-Position) der Bildebene in Abhängigkeit von der Zoomstellung verändert werden. Die hier vorgeschlagene z-Manipulation der Lage der Bildebene 8 durch Variation der Konvergenz/Divergenz des einfallenden Laserstrahls kann zur Justierung bzw. Einstellung der axialen Position der Bildebene 8 des Zoom-Systems genutzt werden. Die Divergenz/Konvergenz der in das Zoom-System einfallenden Laser-

strahlung kann beispielsweise durch Einfügung und/oder Verlagerung optischer Elemente im Strahlengang vor dem Zoom-System erreicht werden, beispielsweise durch Einfügung und/oder Verschiebung von Linsen und/oder durch Manipulation der Strahldivergenz mittels des Strahlumformers 4. Dadurch kann erreicht werden, dass die Hauptstrahlen der Laserstrahlung nicht mehr im wesentlichen parallel, sondern im Winkel zueinander verlaufen, was einer Verlagerung der

Lage einer quasi-punktförmigen Lichtquelle aus dem Unendlichen ins Endliche entspricht. Diese Einführung von Konvergenz/Divergenz ist von der Einführung einer Apertur durch ein DOE oder dergleichen zu unterscheiden, bei der eine Apertur bzw. Winkelverteilung bei fest vorgegebener und lokal unveränderter Hauptstrahlrichtung eingeführt wird. Dieses Verfahren ist beispielsweise nützlich, um bei eingebautem Zoom ohne konstruktive Änderungen am Zoom-System die Lage der Bildebene 8 der verschiedenen Zoomstellungen aufeinander abzustimmen. Beispielsweise führt eine Variation der Hauptstrahlrichtungen des einfallenden Laserstrahles um 0,1 mrad abhängig von der Zoomstellung zu einer axialen Verlagerung der Bildebene 8 um ca. 10 mm (bei Zoomstellung 1) bis zu ca. 500 mm (bei Zoomstellung 5), was einer Variationsbreite zwischen ca. 1% und 50% der Gesamtbaulänge des Zoom-Systems entspricht. Daher kann die Lage der Bildebene, die zu der Zoomstellung mit maximal großem Beleuchtungsfleck gehört, fast unabhängig von der Bildebenenlage des minimalen Lichtflecks verändert werden. Das Verfahren kann unabhängig von der Art des Zoom-Systems auch bei anderen Beleuchtungseinrichtungen nützlich sein.

[0052] Die Erfindung ist anhand eines Zoom-Systems für eine Beleuchtungseinrichtung einer mikrolithographischen Projektionsanlage beschrieben worden. Die Erfindung ist jedoch nicht auf diese Anwendung beschränkt. Erfindungsgemäße Zoom-Systeme können auch als abbildende Systeme verwendet werden, beispielsweise als Fotozoom. Entsprechend der beschriebenen Verwendung im Rahmen einer Beleuchtungseinrichtung wurde die Güte des Systems durch die für Beleuchtungszwecke geeigneten Eigenschaften, die Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung, die Kantenbreite, die Telezentrie etc. gekennzeichnet. Diese Eigenschaften sind direkt äquivalent zu Bildfehlern, die abbildende Optiken charakterisieren. Beispielsweise ist die Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung (Uniformity) äquivalent zur Verzeichnung, d. h. zur Verzerrung des Bildes. Die Kantenbreite entspricht der Bildschärfe oder der Auflösung der abbildenden Optik. Die Telezentrie ist bei abbildenden Systemen nur dann eine erforderliche Eigenschaft, wenn der Empfänger in der Bildebene, beispielsweise eine lichtempfindliche Schicht, bei Licht aus verschiedenen Auftreffrichtungen unterschiedlich reagiert. Die Vignettierungsfreiheit ist äquivalent zu einer über das Bildfeld (in dem sich der Film befindet) gleichmäßigen Beleuchtung.

Tabelle 1

Fläche	r (mm)	d (mm)	hmax (mm)
F1	0.0	144.29	16.50
F2	376.148	8.00	20.41
F3	-484.148	307.053	20.40
F4	-64.925	4.00	12.15
F5	93.605	5.10	12.46
F6	52.433	21.00	25.46
F7	-59.443	317.642	25.38
F8	-2538.89	23.00	46.76
F9	-89.597	240.065	48.88
F10	800.00	40.00	56.33
F11	0.0	110.00	56.07

Tabelle 2

Fläche	Konische Konstante k	C1	C2	C3	C4
F6	-0.50178	-2.3893 e-06	-1.02488 e-09	7.7479 e-13	-1.0364 e-16
F9	1.32194	2.4680 e-07	1.4767 e-10	-4.4164 e-14	1.667 e-17

Tabelle 3

Fläche	Zoom-St. 1	Zoom-St. 2	Zoom-St. 3	Zoom-St. 4	Zoom-St. 5	Zoom-St. 6
F3	307.05	358.51	362.07	352.29	345.10	338.04
F5	5.10	24.12	46.02	67.84	79.15	89.34
F7	317.64	247.17	221.70	209.66	205.55	202.42

1. Zoom-System, insbesondere für eine Beleuchtungseinrichtung einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, das Zoom-System mit:
 einer Vielzahl von Linsen, die entlang einer optischen Achse (3) angeordnet sind und eine Objektebene (6) und eine Bildebene (8) definieren, welche eine Fourier-transformierte Ebene zur Objektebene ist, wobei mindestens eine der Linsen eine verschiebbare Linse (31, 32) ist, die zur Variation der Größe einer in der Bildebene (8) ausgeleuchteten Fläche entlang der optischen Achse (3) verschiebbar ist, und wobei zwischen Objektebene und Bildebene eine zur Bildebene konjugierte erste Zwischenbildebene (25) und eine zur Bildebene Fourier-transformierte zweite Zwischenbildebene (27) liegt und mindestens eine der Linsen (31, 32) in der Nähe mindestens einer der Zwischenbildebene (25, 27) angeordnet ist. 5
2. Zoom-System nach Anspruch 1, bei dem mindestens eine der verschiebbaren Linsen (31, 32) in der Nähe mindestens einer der Zwischenbildebene (25, 27) angeordnet ist.
3. Zoom-System nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Position mindestens einer der Zwischenbildebene (25, 27) bei Verschiebung von verschiebbaren Linsen (31, 32) veränderbar ist. 15
4. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine der Linsen (32) in einer ersten Zoomstellung des Zoom-Systems bildseitig eines Zwischenbildes (25) und in einer zweiten Zoomstellung des Zoom-Systems objektseitig des Zwischenbildes (25) angeordnet ist.
5. Zoom-System nach Anspruch 4, bei dem die Zwischenbildebene eine Pupillenzwischenbildebene ist.
6. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem sich im Bereich der ersten Zwischenbildebene (25) die Strahldivergenz und im Bereich der zweiten Zwischenbildebene (27) der Strahldurchmesser des durchtretenden Lichts stark verändert. 20
7. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die minimale Strahlhöhe in der zweiten Zwischenbildebene (27) (Feldzwischenbildebene) weniger als 50%, insbesondere weniger als 20% der Strahlhöhe in der Objektebene (6) beträgt. 25
8. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein maximaler Verschiebeweg der verschiebbaren Linsen nicht mehr als ca. 10% der Baulänge des Zoom-Systems (7) beträgt und/oder höchstens so groß ist wie der maximale durchleuchtbare Durchmesser in der Bildebene.
9. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine der verschiebbaren Linsen einen maximalen Verschiebeweg hat, der nicht mehr als ca. 5% der Baulänge des Zoom-Systems beträgt. 30
10. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Abstand zwischen einer verschiebbaren Linse (31, 32) und einer feststehenden Linse (30, 33) immer größer ist als der maximale Verschiebeweg.
11. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem jede verschiebbare Linse (31, 32) eine Einzellinse ist.
12. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem alle verschiebbaren Linsen (31, 32) im mittleren Drittel zwischen Objektebene (6) und Bildebene (8) angeordnet sind. 35
13. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der maximale Durchmesser der in der Bildebene (8) beleuchteten Fläche kleiner als ca. 10% der Baulänge des Zoom-Systems ist.
14. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein minimaler Abstand zwischen verschiebbaren Linsen (31, 32) mindestens 25% des minimalen durchleuchtbaren Durchmessers in der Bildebene beträgt. 40
15. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Linse mit minimalem Eigengewicht eine verschiebbare Linse (31) ist.
16. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen verschiebbaren Linsen (31, 32) keine feststehende Linse angeordnet ist. 45
17. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Verhältnis D zwischen einer maximalen Größe und einer minimalen Größe der in der Bildebene (8) ausleuchtbaren Fläche (Dehnungsfaktor) mindestens vier beträgt, wobei der Dehnungsfaktor vorzugsweise gleich oder größer als fünf ist.
18. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine der verschiebbaren Linsen einen maximalen durchleuchtbaren Durchmesser hat, der weniger als 50%, insbesondere weniger als 25% des maximalen durchleuchtbaren Durchmessers in der Bildebene (8) des Zoom-Systems hat. 50
19. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine verschiebbare Linse (31) und/oder mindestens eine feststehende Linse (30) vorgesehen ist, bei der die beleuchtete Fläche in jeder Zoomstellung einen Durchmesser hat, der mindestens 80%, insbesondere mindestens 90% des Durchmessers der Linse beträgt. 55
20. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine feststehende Linse (33; 34) und/oder mindestens eine verschiebbare Linse (32) vorgesehen ist, bei der die beleuchtete Fläche einen stark variablen Durchmesser hat, der vorzugsweise zwischen ca. 60% und ca. 100% des Durchmessers der Linse beträgt, wobei vorzugsweise der Durchmesser der Linse größer als der mittlere Linsendurchmesser ist.
21. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine erste verschiebbare Linse (31) und mindestens eine zweite verschiebbare Linse (32) vorgesehen ist, die beim Wechsel zwischen verschiedenen Zoomstellungen auf unterschiedlichen Verschiebekurven verschiebbar sind. 60
22. Zoom-System nach Anspruch 21, bei dem die Verschiebung der ersten verschiebbaren Linse (31) und der zweiten verschiebbaren Linse (32) derart gekoppelt oder koppelbar ist, dass ein Luftabstand zwischen den Linsen im wesentlichen proportional zur Bildhöhe im Bereich der Linsen ist. 65
23. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der Objektebene (6) und der Bildebene (8) mindestens eine optische Komponente (32, 33) mit mindestens einer asphärischen Fläche (F6, F9) angeordnet ist.

24. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen Objektebene (6) und Bildebene (8) mindestens eine optische Komponente (33) mit mindestens einer asphärischen Fläche (F6) angeordnet ist, die in der Nähe eines Zwischenbildes (25) angeordnet oder anordenbar ist.

25. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen Objektebene (6) und Bildebene (8) mindestens eine verschiebbare optische Komponente (32) mit mindestens einer asphärischen Fläche (F6) angeordnet ist.

26. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine feststehende Linse (33) und mindestens eine verschiebbare Linse (32) mindestens eine asphärische Fläche (F9, F6) hat und/oder bei dem mehr als ein Drittel aller Linsen eine asphärische Fläche aufweist.

27. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in einem energetischen Nahbereich um ein Feldzwischenbild (27) kein optisches Material angeordnet ist, wobei der Nahbereich vorzugsweise bei allen Zoomstellungen frei von optischem Material ist.

28. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine Energiedichte des auf eine optische Fläche treffenden Lichtes bei keiner der zwischen der Objektebene (6) und der Bildebene (8) angeordneten optischen Flächen größer ist als das 1,5-fache der Energiedichte des Lichts in der Objektebene (6).

29. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche bei dem mindestens eine der Linsen (30) quer zur optischen Achse (3) des Zoom-System dezentrierbar gelagert ist.

30. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens ein optisches Element (30) in der Nähe der Objektebene (6) angeordnet ist, wobei vorzugsweise ein Abstand zwischen Objektebene (6) und dem optischen Element (30) weniger als 15% der Baulänge des Zoom-Systems entspricht.

31. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Zoom-System bildseitig telezentrisch ist.

32. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Zoom-System im wesentlichen vignettierungsfrei arbeitet.

33. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen Objektebene (6) und Bildebene (8) weniger als 20 optisch wirksame Flächen vorgesehen sind, insbesondere weniger als 15 optisch wirksame Flächen, wobei das Zoom-System vorzugsweise nur 10 optisch wirksame Flächen hat.

34. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen feststehenden Linsen (33, 34) Bauraum für einen Umlenkspiegel vorhanden ist, wobei vorzugsweise im Bereich des Bauraums die Winkel von Lichtstrahlen innerhalb einer Winkelbandbreite von weniger als 10°, insbesondere weniger als 7° liegen.

35. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem für seine Baulänge (BL), den minimalen Durchmesser f_1 und dem maximalen Durchmesser f_2 einer in der Bildebene beleuchteten Fläche mindestens eine der folgenden Bedingungen gilt:

$$BL > f_1, \text{ insbesondere } BL > 3f_1$$

$$BL < f_2, \text{ insbesondere } BL < f_2/2$$

36. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in Lichtdurchtrittsrichtung hintereinander eine feststehende Linse mit positiver Brechkraft, eine verschiebbare Linse mit negativer Brechkraft, eine verschiebbare Linse mit positiver Brechkraft, und eine feststehende Linse mit positiver Brechkraft angeordnet sind.

37. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine erste und eine zweite verschiebbare Linse vorgesehen ist, und bei dem die Brechkraft der zweiten verschiebbaren Linse (32) größer, insbesondere mindestens dreimal so groß ist wie die Brechkraft der ersten verschiebbaren Linse (31).

38. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem jede verschiebbare Linse eine Brechkraft hat, die größer ist als die Brechkraft jeder feststehenden Linse, insbesondere mindestens doppelt so groß.

39. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine, vorzugsweise jede verschiebbare Linse eine Brechkraft hat, die größer ist als die Brechkraft des gesamten Zoom-Systems, vorzugsweise mindestens fünf- oder zehnmal so groß.

40. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein maximaler Inzidenzwinkel der auf eine optische Fläche auftreffende Strahlung kleiner als 50°, insbesondere kleiner als 45° ist.

41. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem Lichtbüschel in jeder Zoomstellung in der Bildebene (8) eine Apertur von weniger als 0,055 haben.

42. Zoom-System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch dem Zoom-System zugeordnete Einstellmittel zur Einstellung der axialen Positionen der Bildebene (8) entlang der optischen Achse (3), wobei die Einstellmittel vorzugsweise mindestens eine Einrichtung zur Veränderung der Konvergenz/Divergenz der von einer Lichtquelle (2) kommenden Strahlung umfassen.

43. Beleuchtungseinrichtung (1) für eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit einem Zoom-System zur Variation des Kohärenzgrades der von der Beleuchtungseinrichtung bereitstellbaren Beleuchtung, wobei das Zoom-System gemäß einem der Ansprüche 1 bis 42 aufgebaut ist.

44. Beleuchtungseinrichtung nach Anspruch 43, bei dem in der Objektebene (6) des Zoom-Systems ein optisches Rasterelement (5) angeordnet ist, welches zur Erzeugung eines Fokusgitters derart ausgelegt ist, dass ein Bild des Fokusgitters innerhalb des Zoom-Systems gebildet wird, wobei innerhalb des Zoom-Systems im Bereich des Bildes des Fokusgitters kein optisches Material angeordnet ist.

45. Beleuchtungseinrichtung nach Anspruch 43 oder 44, bei dem das Zoom-System eine Objektebene (6) und eine Bildebene (8) hat und bei dem Einstellmittel zur Einstellung der axialen Position der Bildebene (8) vorgesehen sind, wobei die Einstellmittel vorzugsweise Mittel zur Veränderung der Konvergenz/Divergenz der von einer Lichtquelle (2) der Beleuchtungseinrichtung kommenden Strahlung in Lichtflussrichtung vor dem Zoom-System aufweisen.

46. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen mit folgenden

Schritten:

Beleuchtung eines in einer Objektebene eines Projektionsobjektivs angeordneten Retikels (16) mit Hilfe einer Beleuchtungseinrichtung (1), die ein Zoom-System (7) umfasst, welches gemäß einem der Ansprüche 1 bis 42 aufgebaut ist;

Erzeugung eines Bildes des Retikels auf einem lichtempfindlichen Substrat;

wobei der Schritt der Beleuchtung des Retikels eine Änderung der Eigenschaften des auf das Retikel einfallenden Lichtstrahles durch Verschiebung mindestens einer Linse des Zoom-Systems entlang der optischen Achse des Zoom-Systems umfasst.

5

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

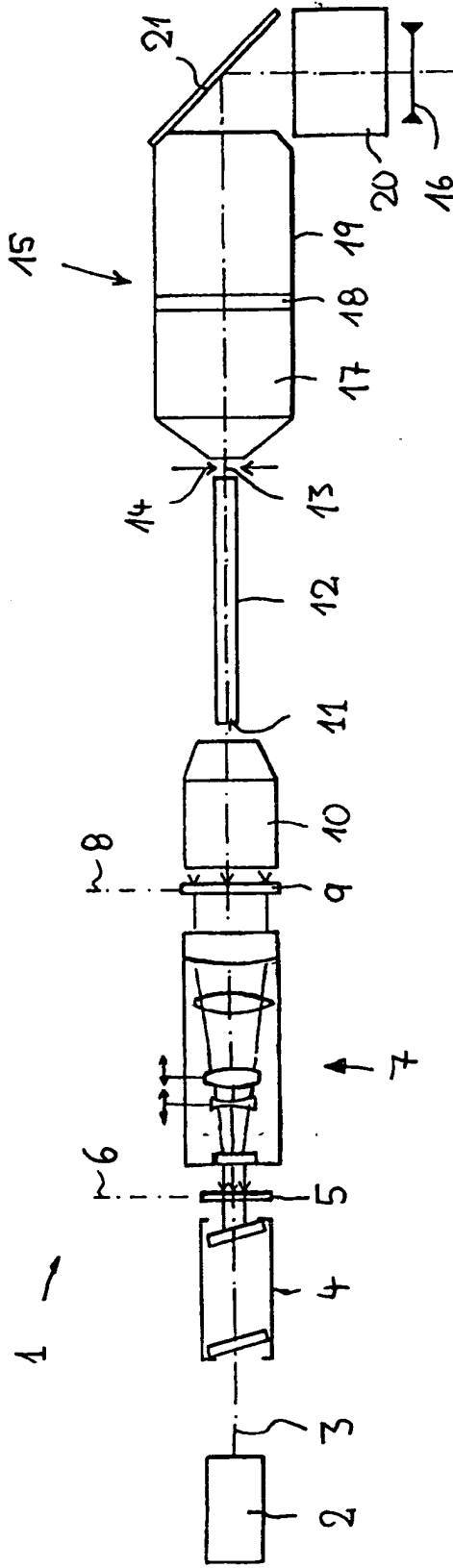
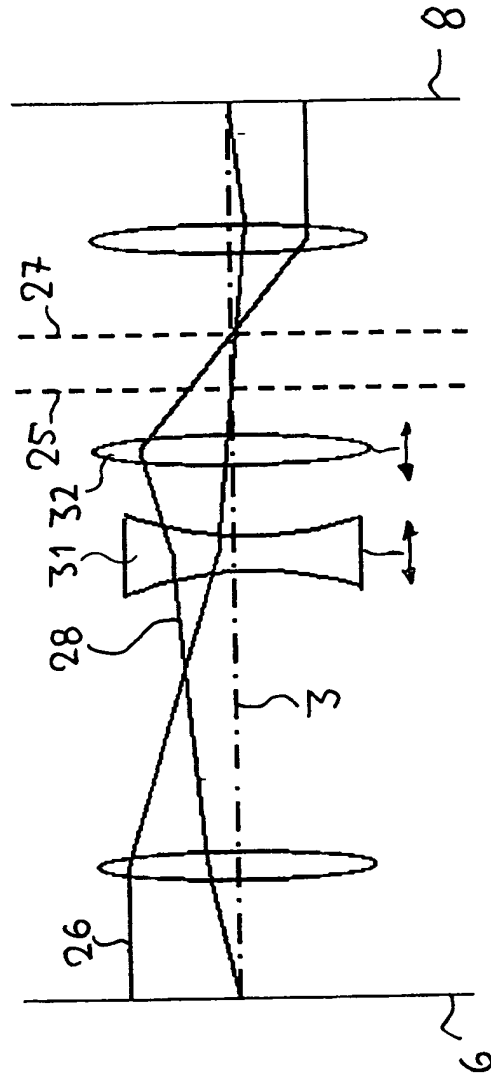


Fig. 2



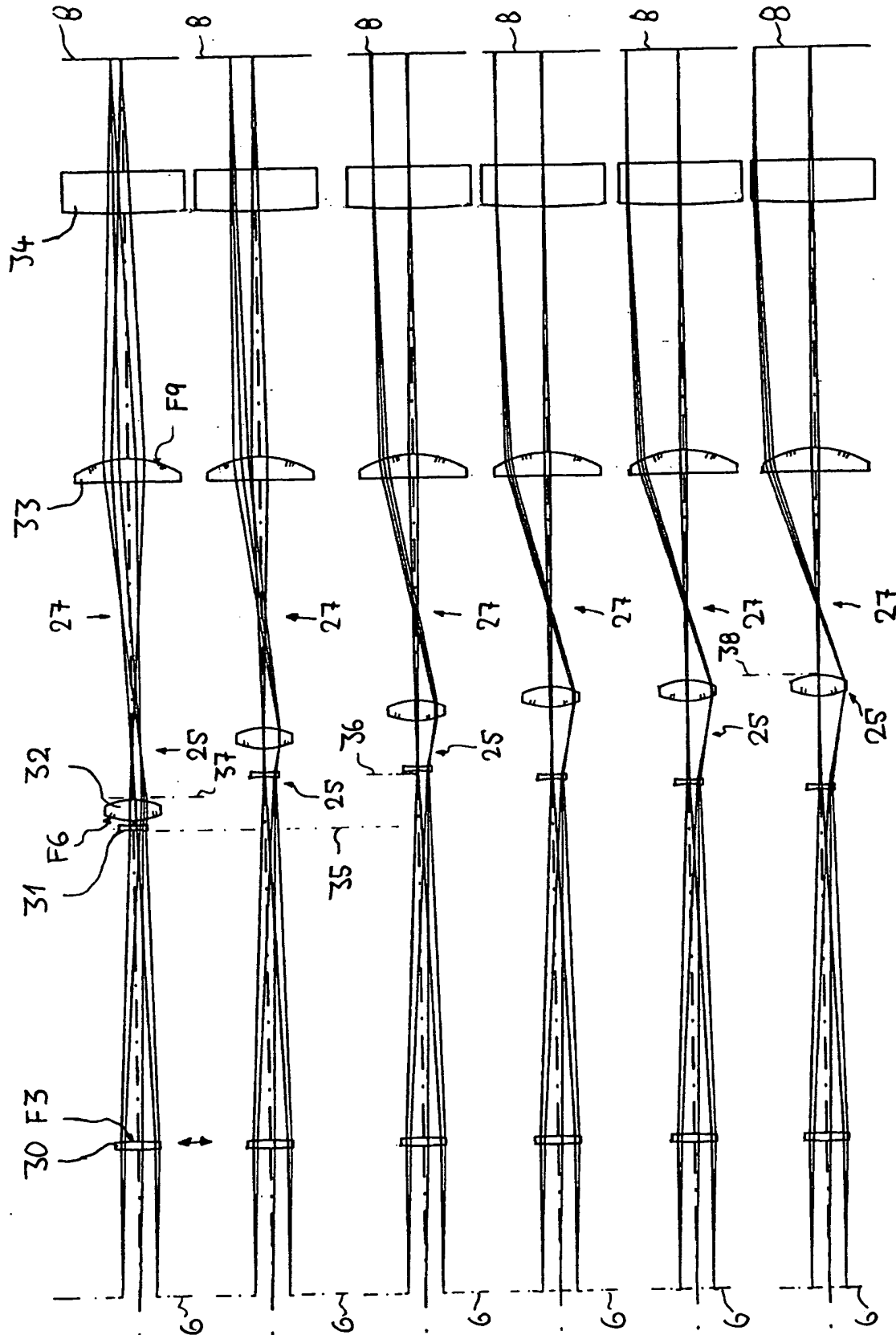
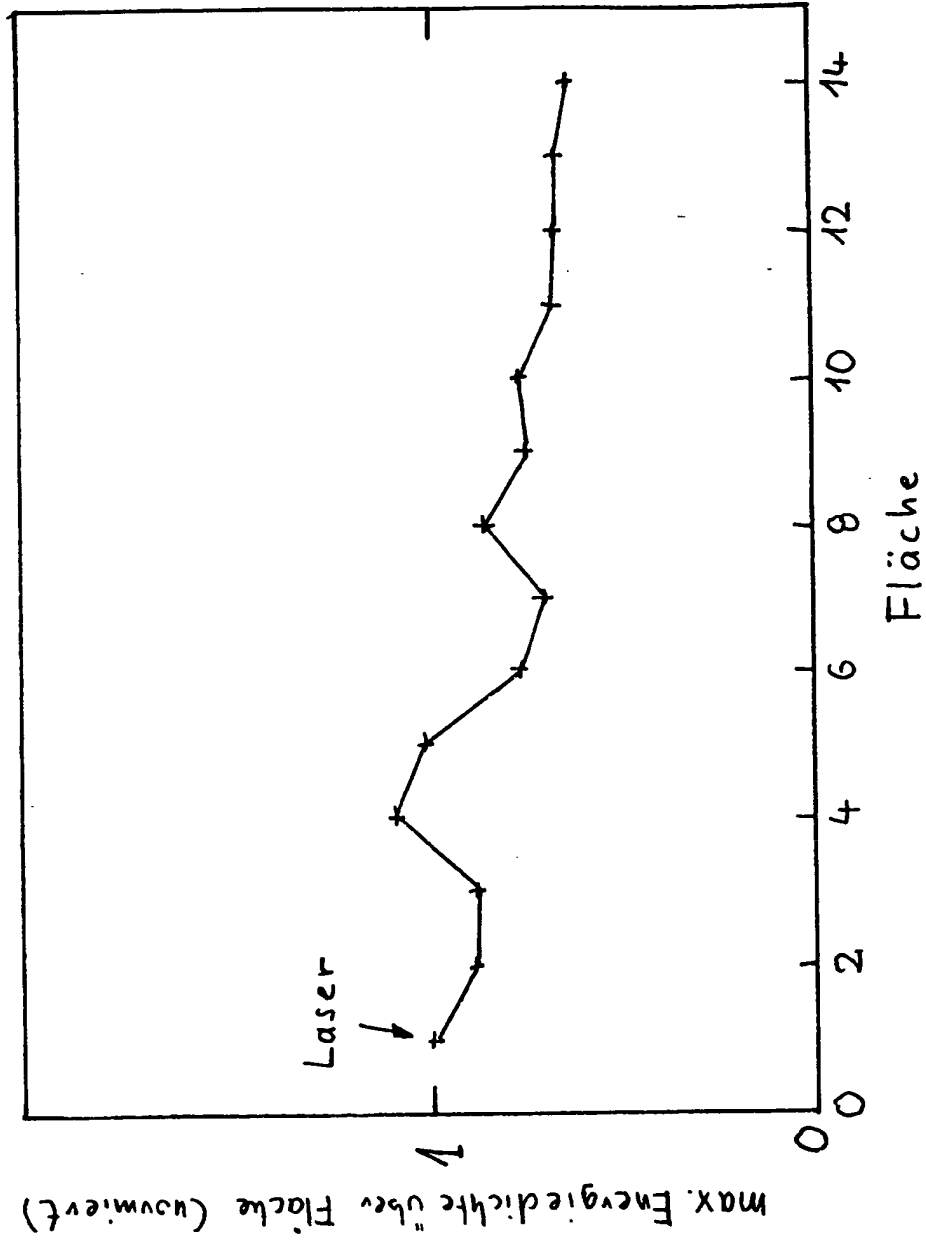


Fig. 3

Fig. 4



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record.**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.